2026

შეუქცევადობა და ენთროპული შეზღუდვა გაუხშოებულ კოსმოსურ პლაზმაში

პროექტი XV: ასტროფიზიკურ ბრტყელ და დისკურ წანაცვლებით დინებათა დინამიკა - არაიდეალური მაგნეტოჰიდროდინამიკური ეფექტები

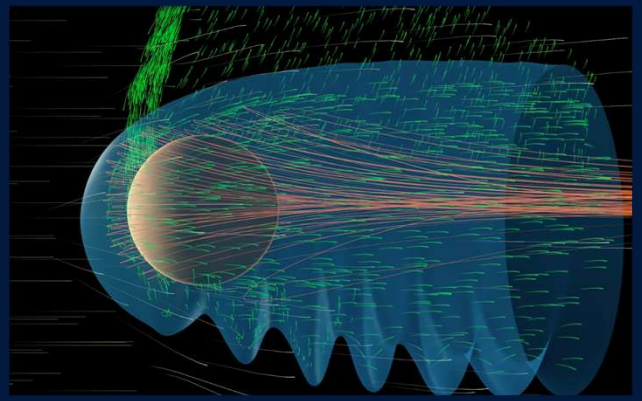
ალექსანდრე თევზაძე

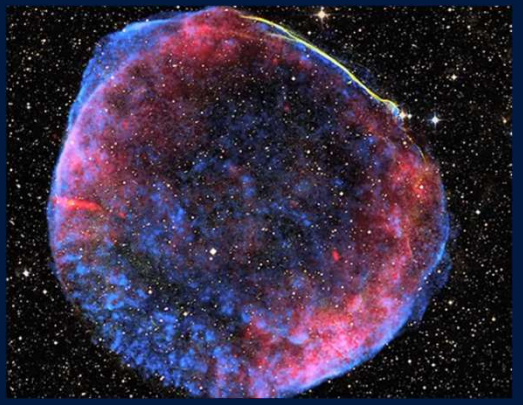
საქართველოს ევგენი ხარაძის ეროვნული ასტროფიზიკური ობსერვატორია

12 ნოემბერი, 2026

გაუხშოებული კოსმოსური პლაზმა

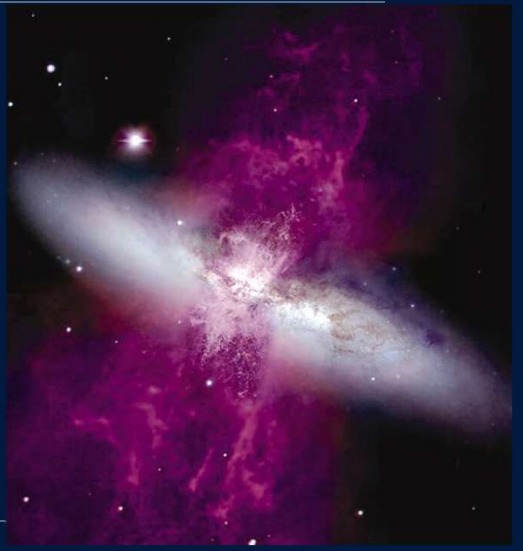
იონების საშუალო თავისუფალი განარბენი ბევრად აღემატება პროცესების სივრცით მასშტაბს





- ✓ მზის ქარი
- ✓ ვარსკვლავური ქარები
- ✓ გალაქტიკური ქარები
- ✓ ზეახალის აფეთქების ნარჩენები
- ✓ დამაგნ. რელატივისტური ჯეტები
- ✓ *გაუხშოებული დამაგნიტებული გარემო*





დაუჯახებელი პლაზმა: ვლასოვის აღწერა

$f = f(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{v}, t)$ ნაწილაკების განაწილების ფუნქცია

ვლასოვის განტოლება

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \boldsymbol{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{r}} + \frac{\boldsymbol{F}_\mathrm{L}}{m} \cdot \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{v}} = 0$$

ელ.მაგ. ველი: ლორენცის ძალა

$$\boldsymbol{F}_\mathrm{L} = q\left(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}/c\right)$$

სიმკვრივე და საშუალო სიჩქარე

$$\rho = m \int f \mathrm{d}^3 v\,, \qquad u_i = \frac{m}{\rho} \int v_i f \mathrm{d}^3 v \qquad n = 0,\ 1$$

n რიგის ცენტრალური მომენტი

$$M^{(n)}_{i_1 \cdots i_n} = m \int c_{i_1} \cdots c_{i_n} f \mathrm{d}^3 v \qquad n = 2+$$

მაკროსკოპული შეუქცევადობა

როგორ ჩნდება მაკროსკოპული შეუქცევადობა, თუკი პლაზმის ევოლუციას აღწერს შექცევადი ვლასოვის განტოლება?

შექცევადი პროცესი: *მუდმივი ენთროპია* *შეუქცევადობა:* *ენთროპიის ზრდა*

შექუცევადობის (ინფორმაციის დაკარგვის) წყაროები

- **ფაზური შერევა.** სხვადასხვა სიჩქარით მოძრავი ნაწილაკების ფაზების შერევა (ლანდაუს ჩახშობა).
- **ფილამენტაცია.** განაწილების ფუნქციაში წვრილი სტრუქტურების განვითარება.
- **ფაზურ სივრცეში გასაშუალოება.** სასრული ზომის უჯრედებში შიდა სტრუქტურების შესახებ ინფორმაციის დაკარგვა.
- **ანალიზური ჩაკეტვის ფორმა.** ინფორმაცია რჩება მოდელის მიღმა, მაღალი რიგის მომენტებში. ჩაკეტვისას ინფორმაციის ნაწილი იკარგება.

BBGKY იერარქია და ჩაკეტვა

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} M^{(n)} + \mathcal{L}^{(n)} M^{(n)} + \mathcal{B}^{(n)} M^{(n)} = -\nabla \cdot M^{(n+1)}$$

n-რიგში გარე წყაროა: $J^{(n)} \equiv \nabla \cdot M^{(n+1)}$

ბოგოლიუბოვის უსასრულო იერარქია - BBGKY

ალგებრული ჩაკეტვა

$$M^{(n+1)} = 0$$

ფუნქციური ჩაკეტვა

$$M^{(n+1)} = \mathcal{F}\left(M^{(0)}, \ldots, M^{(n)}\right)$$

„ხისტი" ჩაკეტვა (hard closure)

$$J^{(n)} = 0$$

ენთროპია ინახება

„რბილი" ჩაკეტვა (soft closure)

$$J^{(n)} \neq 0$$

ინფორმაციის შემოსვლა
მაღალი რიგის მომენტებიდან

n-რიგის დაყვანილი ენთროპია

„n-რიგის ენთროპია“

$$S^{(n)} = -\int f^{(n)} \ln f^{(n)} \mathrm{d}^3 v$$

$$S = \lim_{n\to\infty} S^{(n)}$$

$$S^{(n+1)} \leq S^{(n)}$$

ენთროპიების მონოტონური იერარქია

ხისტი S_0 და რბილი ჩაკეტვის S_1 ენთროპიები

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} S_0^{(n)} = 0\,, \qquad \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} S_1^{(n)} \geq 0$$

„დაყვანილი ენთროპია“

$$R^{(n)} = S_1^{(n)} - S_0^{(n)}$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} R^{(n)} \geq 0$$

ენთროპიის ზრდის კანონი

სტატისტიკურად დასაშვები ევოლუციისას დაყვანილი ენთროპია არ მცირდება.

სტატისტიკური განხორციელებადობა

მე-2 რიგის ენთროპია; 3-ე რიგის გარე წევრები;

ხისტი ჩაკეტვა (CGL)

$$S_{\mathrm{CGL}} = \frac{1}{3}\ln\left(\frac{P_{\parallel}P_{\perp}^{2}}{\rho^{5}}\right)$$

რბილი ჩაკეტვა (16-momentum)

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}S_{1}^{(2)} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\ln\left(\frac{P_{\parallel}P_{\perp}^{2}}{\rho^{5}}\right)^{1/3}$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}R^{(2)} = \Sigma_{\parallel} + 2\Sigma_{\perp} + 2\Sigma_{B}$$

პარალელური სითბ. ნაკადი

$$\Sigma_{\parallel} = -U_{\parallel}\nabla_{\parallel}\ln\left(\frac{Q_{\parallel}}{B}\right)^{1/3}$$

მართობული სითბ. ნაკადი

$$\Sigma_{\perp} = -U_{\perp}\nabla_{\parallel}\ln\left(\frac{Q_{\perp}}{B^{2}}\right)^{1/3}$$

მაგ. ველის არაერთგვაროვნება

$$\Sigma_{B} = -U_{\perp}\frac{P_{\perp}}{P_{\parallel}}\nabla_{\parallel}\ln(B)^{1/3}$$

მაგნ. ანიზოტროპიის ენთროპული შეზღუდვა

სტატისტიკური განხორციელებადობის პირობა

$$\Sigma_{\parallel} + 2\Sigma_{\perp} + 2\Sigma_{B} \geq 0$$

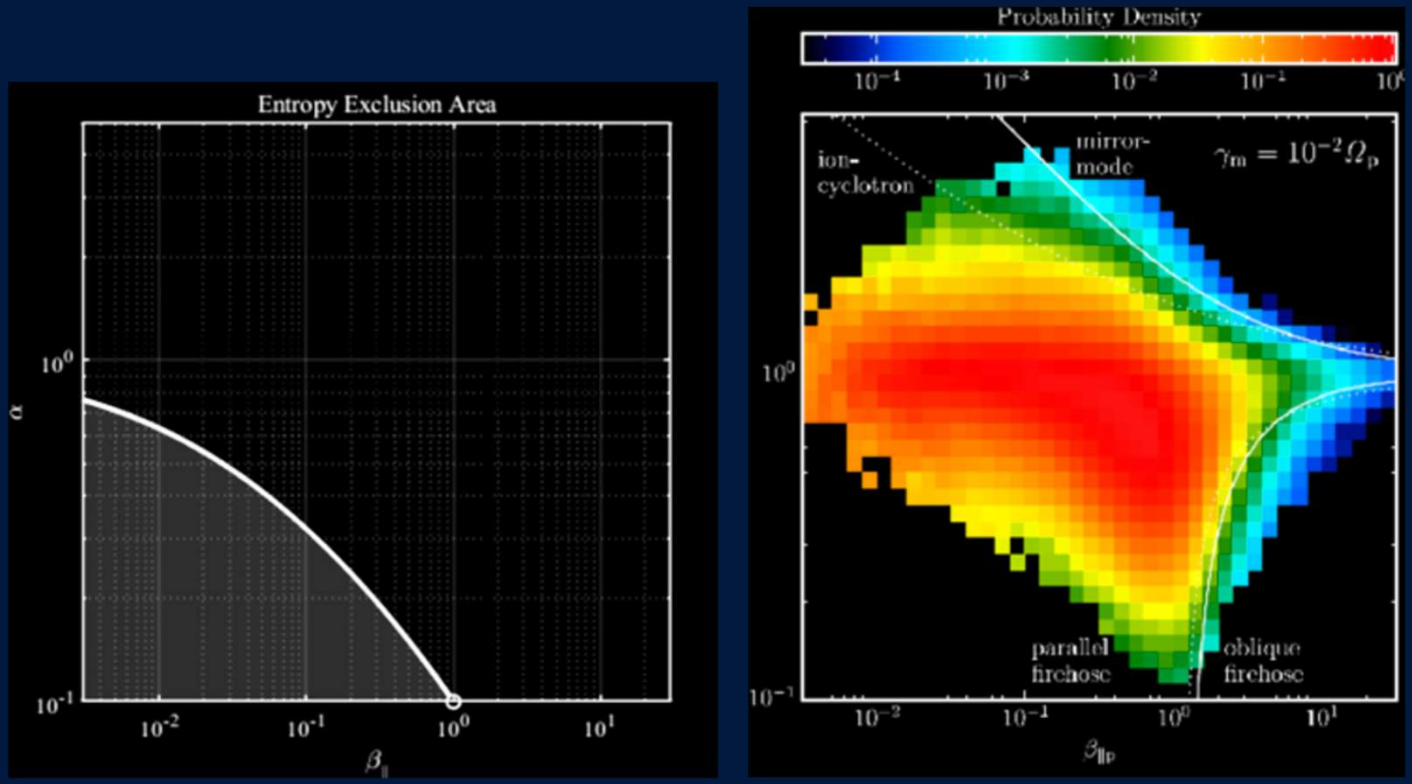
$$U_{\parallel} = \chi \left(\frac{P_{\parallel}}{\rho} \right)^{1/2}, \quad U_{\perp} = \chi \left(\frac{B^2}{4\pi\rho} \right)^{1/2}$$

$$\frac{\mathrm{d}\ln\alpha}{\mathrm{d}\ln\beta_{\parallel}} + \frac{1}{2}\left[1 - \alpha + \left(\frac{\beta_{\parallel}}{8}\right)^{1/2}\right] \leq 0$$

α წნევის ანიზოტროპი,
β∥ პლაზმის პარალელური ბეტა.

ფაზური სივრცის აკრძალული ზონები: ენთროპია კლებულობს, ინფორმაცია ჩნდება!

ენთროპული განხორციებადობა და მზის ქარი



ანიზოტროპული მზის ქარის ფლუქტუაციები

მარჯვენა გრაფიკი ადაპტირებულია Verscharen et al. (2019), ნახ. 21-დან (CC BY 4.0).

დასკვნები და პუბლიკაციები

შეუქცევადობის წყარო	რბილი ჩაკეტვისას ინფორმაცია გადის („ჟონავს“) მოდელის მიღმა დარჩენილ მომენტებში.
ენტროპული შეზღუდვა	დაყვანილი ენთროპიის ზრდა ფულუქტუაციების ფიზიკურ თვისებებს ადებს ალგებრულ შეზღუდვას.
პრაქტიკული მაგალითი	მზის ქარის მონაცემებთან თვისებრი თანხმობა.

პუბლიკაციები 2026

- ✓ A. G. Tevzadze, “*Irreversibility and Entropy Exclusion in Collisionless Plasmas*”**,** arXiv:2602.01314 (2026)
- ✓ E. S. Uchava, A. G. Tevzadze, *“Conserved thermomechanic invariant in extended fluid description of collisionless plasmas”,* Phys. Rev. E, **114** (2026)